

# ロケットを用いたプラズマ波動波数計測†

大 家 寛\*・小 野 高 幸\*\*・三 浦 悟\*

Wave number measured by rockets

By

Hiroshi OYA, Takayuki ONO and Satoru MIURA

**Abstract:** Wave number  $k$  of the naturally propagating plasma waves in the ionospheric plasma has been measured through out three rocket experiments. The observation results indicate that the generated plasma waves by the low energy electron beams, that are emitted artificially from the heater cathode, reveal the characteristics of the following 3 kinds of the mode;

- i) ion cyclotron waves that is stretched to the LHR granch
- ii) ion cyclotron harmonic waves

and

- iii) ion acoustic waves.

## 概 要

宇宙空間に存在するプラズマ波動の波数の計測について、K-9 M-61号機以降、3回にわたるロケット実験を行なった。これは自然に発生するプラズマ波動の波数を対象としているが、中低緯度電離圏での計測であるため、人工電子ビームを用いて波動を励起させた。その結果、低エネルギー電子ビームにより励起されるプラズマ波動は、

- i) LHR branch にいたる ion cyclotron 波
- ii) ion cyclotron harmonic 波
- iii) ion 音波

の3種類のモードの波が混在している可能性が、一層明らかになった。

## 1. 序

宇宙空間プラズマ波動の観測は、従来、周波数空間で実施され、数多くのダイナミックスペクトルの観測が行なわれ、その情報を基に波動現象の検討が進められてきた。しかし、波動の性質を完全に把握するためには、周波数空間の情報に加えて、波数空間における情報が

---

\* 東北大学理学部

\*\* 国立極地研究所

† 宇宙研特別事業費による研究論文

必要であることは、永らく議論されてきたところである。

この波数測定装置の開発をめざし、われわれは、1978年1月に打ち上げられたK-9M-61号ロケットでのプラズマ波動波数計測に関する第一回目の観測以来、その結果をふまえて、K-9M-66号機、K-9M-67号機と装置の改良が進められ、それぞれ実験に成功してきている。それぞれの実験の特長を表1に示すが、本論文では、第三回目の実験であるK-9M-67号機の結果を中心として述べることにする。

この波数計測器の観測対象は自然プラズマ波動であるが、中低緯度電離圏では、極域電離圏の場合とは異なり、絶えず粒子降下を起こしているわけではない。したがって、ロケットに搭載された Hot Cathode から放射される低エネルギー電子ビームを用いて波動励起を行ない、その波動に対して波数を計測することにした。この波動は物理的には自然プラズマ波動と同様なふるまいをするため、実験目的に充分適合している。

電子ビームによる波動励起の予備的な研究として、地上のスペースチェンバーを用いて実験することができる。スペースチェンバーを用いると、高度100 km程度の電離圏の状況を再現することができる。チェンバー内でプラズマを発生させ、飛翔前の装置を用い、Hot Cathode から、低エネルギー電子ビームを放射し、励起されるプラズマ波動を観測したが、この時に得られた結果についても比較・検討した。

表1 これまでに実施されたプラズマ波動波数計測実験

使用ロケット	発射日時 (JST)	特 長
K-9M-61	1978年1月27日 20:00	掃引周波数受信 HC 2個 HC バイアス 直流バイアス
K-9M-66	1979年1月21日 18:06	固定周波数受信 HC 2対 直流バイアス
K-9M-67	1979年8月18日 16:00	固定周波数受信 HC 2対 HC バイアス 直流バイアス

## 2. K-9M-67号機の波数計測システム

図1に波数計測システムの外観を示す。ロケット軸方向と、それに垂直な方向にのびた一對のブームに電位測定用のピックアップが取り付けられ、Electronicsを収容するパッケージの下部に2対の Hot Cathode が装着されている。それぞれのブームに取り付けられたA1～A3、B1～B3及びC1、C2のセンサー群のうち、AおよびBセンサー群は一直線上に配置されている。なお、これらのセンサーは、ロケット本体から充分離すことにより、ロケ

ット本体が誘起する影響があらわれにくくしている。また、センサー群は不等間隔に配置することにより、位相差の測定上不可避となっている  $2\pi n$  ( $n$ は整数) の ambiguity が系統的に発生しないように設計されている。図2にシステムの回路系の block diagram を示す。A1~C2にわたる8点での電位 pick up は channel selector を通して4 channel 選択する。この選択された信号は、Mixer 段において、きめられた周波数成分を中間周波数に変換し、

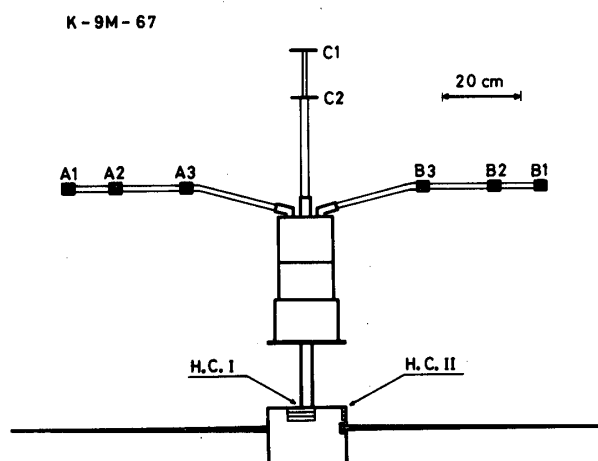


図1 プラズマ波動波数計測装置の外観。波数計測用センサーが3方向に伸展し、電子回路のパッケージがロケット本体に組み込まれているが、その下部に 1.2 m dipole antenna と、2 対の Hot Cathode が装着されている。

K-9M-67

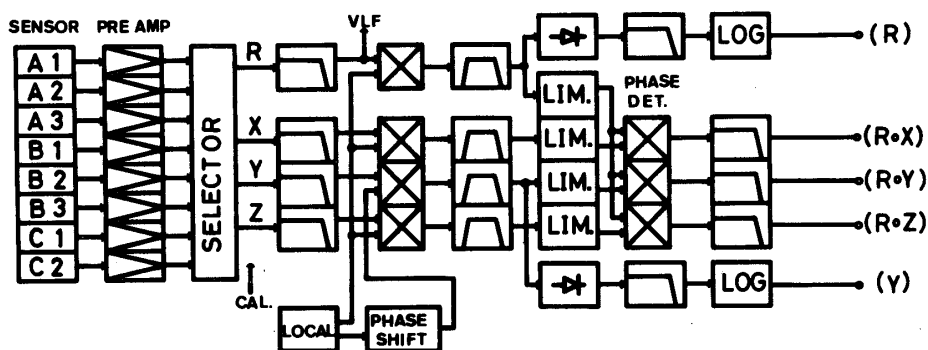


図2. 波数計測システム。A1~C2の8個のセンサーでピックアップされる電位変動のうち4個の信号を選択し、R channel を基準とした他 channel の位相を測定し、さらに2つのセンサーにおける受信強度も測定する。

1F 段において 60 Hz の超狭帯域幅をもって増幅し、R channel を基準に、他の channel の信号との位相差を digital 位相検出器で測定し出力する。さらに、2つの channel における強度の情報も出力する。ここで、位相差を正確に測定するため、pre-amp. 以下の電子回路の位相特性はすべて同一になるように調整されている。

### 3. 波数観測及び解析結果

K-9M-67 号ロケットは 1979 年 8 月 18 日 16 時 (JST) に発射され、図 3 に示すような航路に沿って飛翔した。この時得られたデータ例を図 4 に示す。受信した固定周波数 12 波のうちの一部を示す。強い強度の部分が周期的に観測されているが、このうち発射後 328.15 秒付近のデータの一部の拡大図を図 5 に示す。たとえば、発射後 328.14 秒付近での強い強度をもった波動に対して位相は明確なほぼ一定値を示している。これに対して受信強度が低いと、図 5 の下部に NOISE と表示された時期に対応する場合のようにランダムノイズを示している。解析対象としたデータは図 5 で DATA と表示された時期のように、

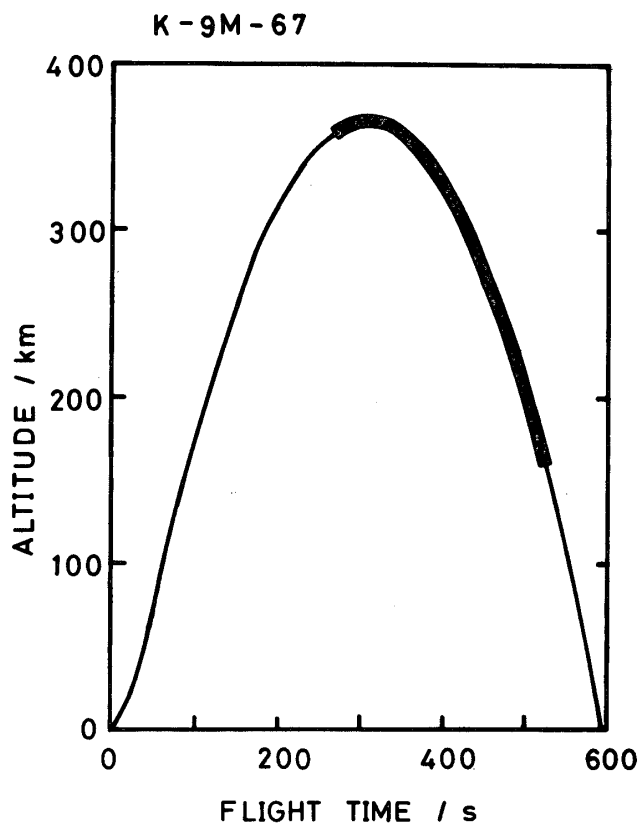


図3 K-9M-67号ロケットの飛翔時間に対する高度の関係。太線で示した部分で低エネルギー電子ビームによる波動励起が行なわれた。

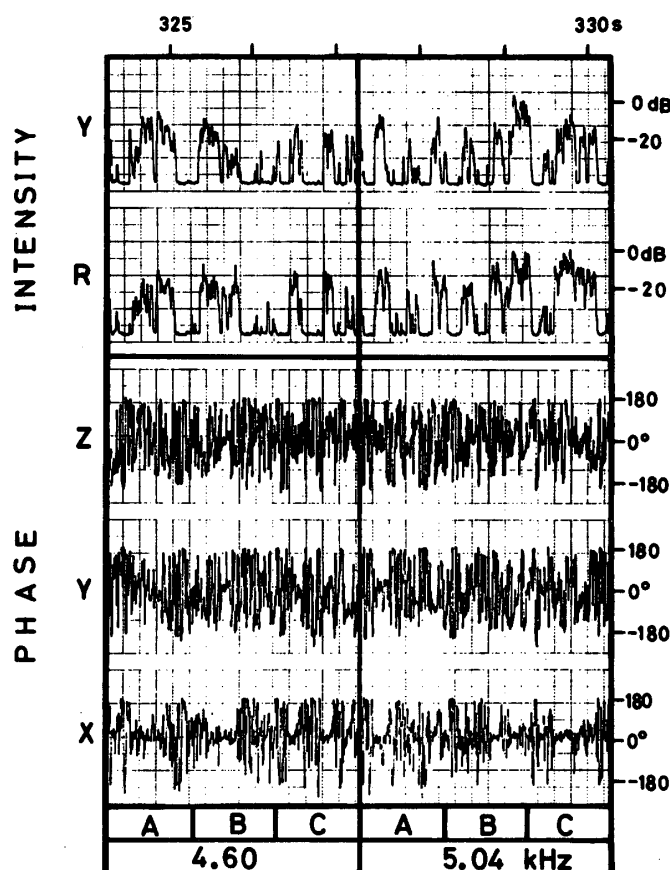


図4 センサー間で受信された電位の位相差および受信強度のデータの一例。発射後 306 秒から 342 秒までのデータの一部を示す。

各 channel とも受信レベルが一定の threshold level を越え十分な位相値を示した点である。

観測で得られたデータは以下のような手法で解析した。たとえば、K-9M-66 号機の波数観測の結果について、波数の spin phase 依存性を図 6 に示すが、結果は spin 位相の変化に対応して変化する成分と、spin phase に依らず一定値になる成分との 2 種類のグループに分かれていることを示している。すなわち、spin の位相に依存しない波数は、波動の源がロケットと共に回転していることを示しているが、一方、spin の位相に依存して変化する波数は、波動の発生と伝播が空間の一方方向に定められていることを示している。

後者の場合のように波数が spin phase に依存している場合、観測される波数の絶対値 ( $k_{\text{obs}}$ ) は、宇宙空間におけるプラズマ波動の波数ベクトルの sensor 方向(この場合 A, B センサーの方向)の成分であるから、波数ベクトルが平面波であると仮定すると、

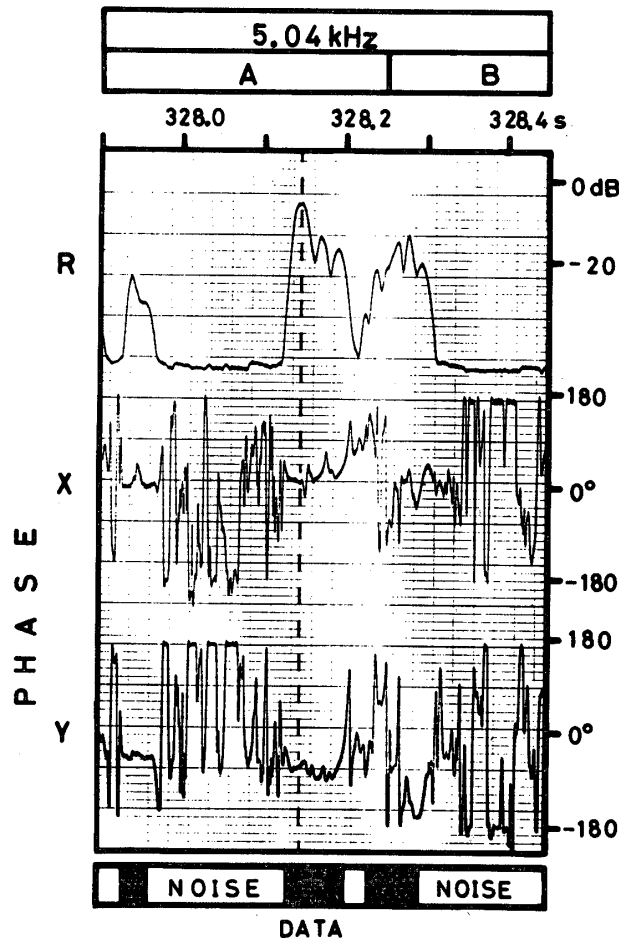


図5 図4のデータのうち、発射後328.2秒付近のデータの拡大図。波動の受信強度が一定レベルより高いと、DATA と表示している部分のように位相は明確なほぼ一定値を示している。

$$k_{\text{obs}} = k_x \cos \phi + k_y \sin \phi \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $\phi$ は、

$$\phi = \omega t - \phi_0 \quad (2)$$

で与えられ spin phase を示す。(1)式を得るにあたってここで考慮している座標系は、 $z$ 軸を spin 軸とし、磁束密度ベクトルが  $yz$  平面上にある(図7参照)ように選ぶ。したがって、A-B sensorは  $xy$  平面上を回転しているが、ここで A-sensor 方向と  $x$  軸のなす角が  $\phi$  であり、磁力線と spin 軸方向のなす角が  $\psi$  となる。いま、磁力線に対して垂直な波数ベクトル  $\vec{k}$  を持つ波動を考えると、

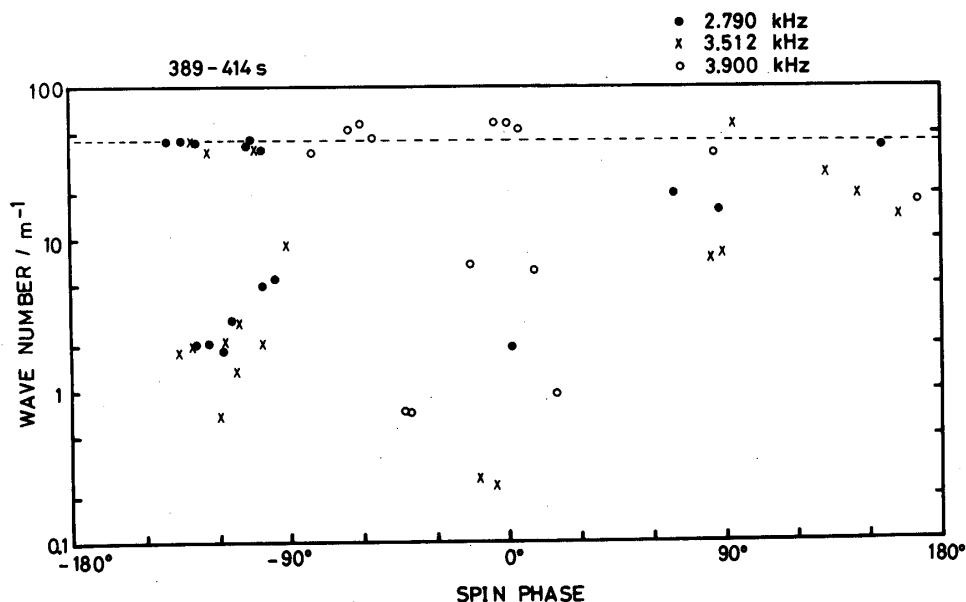


図6 K-9M-66号機により観測された波数 $k$ と spin phase の関係. 波数 $k$ は spin phase に依存しているグループと依存していないグループの2種類に分類することができる.

$$\vec{k} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

が成立する. すなわち,

$$k_y \sin \psi + k_z \cos \psi = 0 \quad (4)$$

となる. spin phase  $\psi$  が異なった2つ以上のデータを用いることにより, (1)式を統計的に解けば,  $k_x$ ,  $k_y$  が求められ, さらに(4)式により ( $\psi$ は姿勢計のデータ〔GA〕を解析して得られる)  $k_z$  が求められる. したがって, 波数の絶対値は,

$$k = (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式で求められることになる. このような $k$ の決定法は, 固定周波数で波動を受信し, 位相差を計測することが可能になった, K-9M-66号機以降の実験で用いられているシステムの特徴である.

また, spin の位相に依存しない波数か, あるいは, spin の位相に依存する場合でも, 1点のみのデータから解析する場合には, 波数 $\vec{k}$ が磁力線に対して垂直であると仮定される場合には,

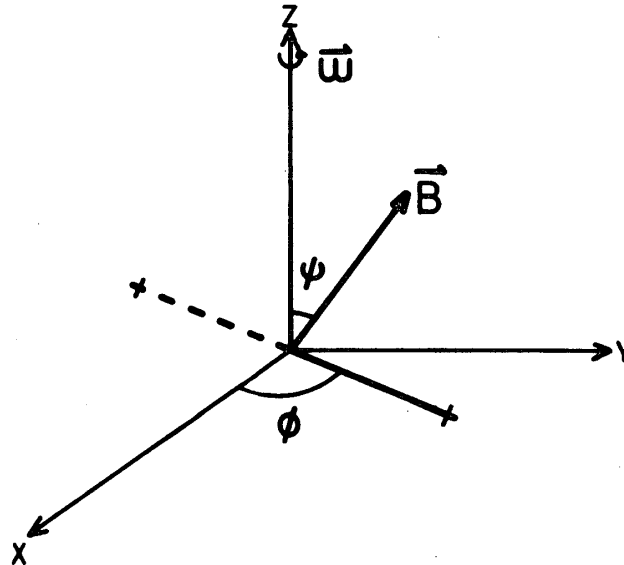


図7 解析した時に用いた座標系。ロケットの spin 軸方向を  $z$  軸，磁力線方向が  $yz$  平面上に乗るように座標軸がとられている。

$$k \geq \frac{k_{\text{obs}}}{\sin \theta} \quad (6)$$

が得られる。ここで  $\theta$  は磁力線と A-sensor 方向のなす角で，図7の中で定義されている  $\psi$  及び  $\phi$  に対し，

$$\cos \theta = \cos \psi \sin \phi \quad (7)$$

で与えられる。ここで用いている解析結果は(6)式において等号をとって得られた値をとる。

さらに， $\vec{k}$  が磁力線に対して平行であると仮定される場合には，一点のみのデータから，

$$k = \frac{k_{\text{obs}}}{\cos \theta} \quad (8)$$

として波数の絶対値が求められる。

ロケット実験で観測されたプラズマ波動の分散関係は，すでに述べたように  $2\pi n$  の ambiguity をもっている。しかし，これはもし発生した波動が平面波となっている時，周波数一波数領域に存在する理論的な分散関係と比較することにより，取り除くことができる。静電的プラズマ波動の場合減衰を考慮すれば，長時間にわたって存在する波動は，波数ベクトル  $\vec{k}$  が，



磁力線に対して垂直あるいは平行である場合が多いので、観測された波動も、磁力線方向あるいは、磁力線に対して垂直方向の  $\vec{k}$  をもつ波動の sensor 方向の成分であるという、2つの極端な場合を仮定している。

ここで比較する波動の波数に関する理論値は、したがって静電的プラズマ波動で、特に、イオン音波、LHR branch に至る ion cyclotron 波、および ion cyclotron harmonic 波の3種類である。それぞれの分散曲線の理論値は、図8、図9に示されているが、それぞれに対応する分散特性に関して、ロケットの運動による Doppler shift を考慮して、2本の細い実線（イオン音波の場合）で変化を示す；また、太い一点鎖線（LHR 波動の場合）で示しているが、Doppler shift は角度依存性を持ち、図に示されているこれら2本の限界線で囲まれた領域に広がる；さらに、ion cyclotron harmonic 波の有効分散領域は、2本の太い破線で囲まれた領域で示されている。

観測された波動が磁力線に対して平行な  $\vec{k}$  をもつと仮定した場合の結果を図8に示すが、比較的低い周波数側でイオン音波が存在している。これに対して、観測値が磁力線に対して垂直な  $\vec{k}$  をもつと仮定した場合の結果を図9に示す。観測された波動は、LHR 波および、ion cyclotron harmonic 波の有効分散領域に存在している。

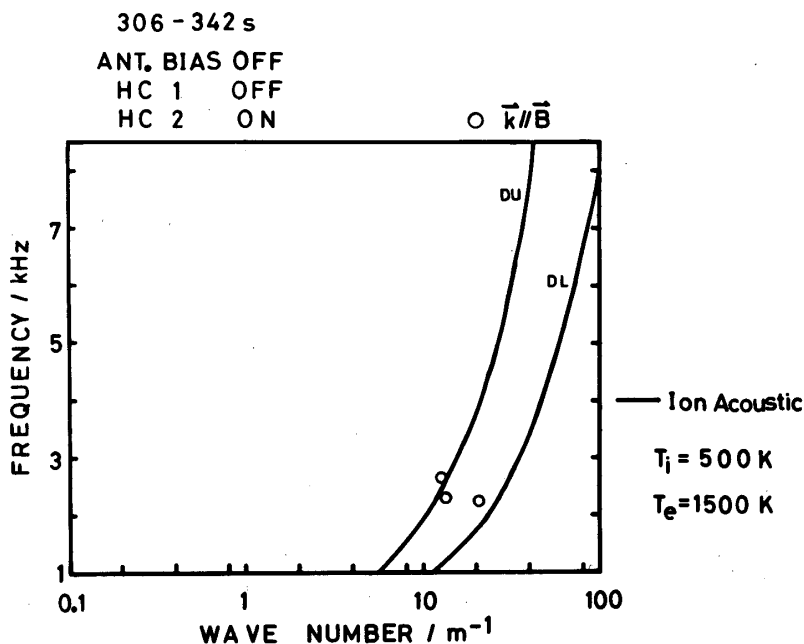


図8 磁力線に平行な波数  $k$  の観測結果。理論的なイオン音波の分散曲線と対比して示す。

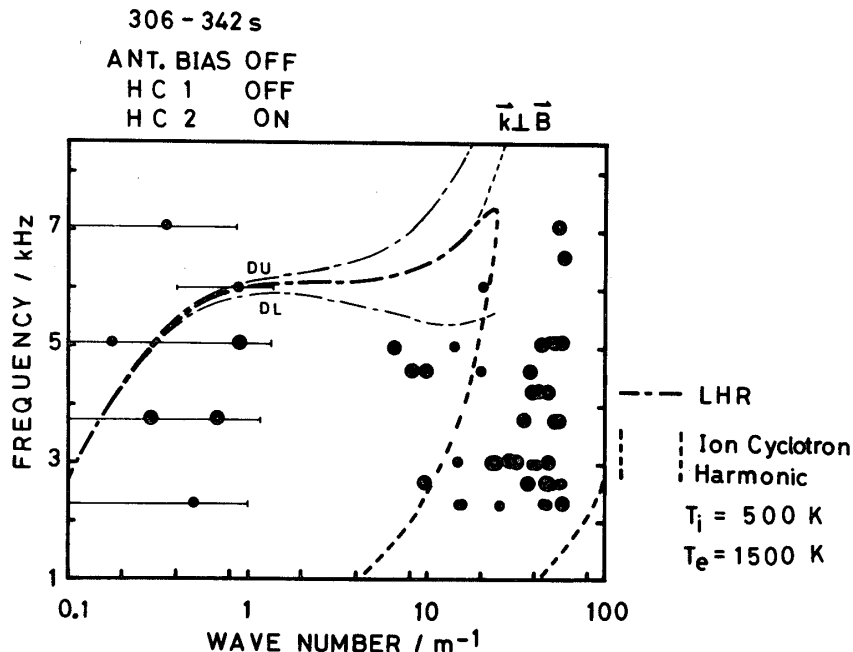


図9 磁力線に垂直な波数  $k$  の観測結果。イオンサイクロトロン高調波および LHR イオンサイクロトロン波の2種類のモードに分類して示す。

#### 4. ダイナミックスペクトルとの対比

波数測定と同時に dipole antenna, および波数測定用 sensor の両者を用いて, 広帯域にわたるダイナミックスペクトルの観測を行なったが, 図10は, 図8, 9に対応した時点でのダイナミックスペクトルである。ここで波数測定を行なった固定の受信周波数を直線で示している。波数測定は, 広帯域に広がったプラズマ波動の一部分の周波数について観測していることが明瞭であるが, 図10の上段の場合のプラズマ波動は, 図9に示す波数測定結果と対比することにより, ion cyclotron harmonic 波が卓越していると断定できる。これに対して, 波数計測が, 6.0 kHz および, 6.5 kHz の周波数で行なっている時期には, 図10の下段に示すように, LHR 周波数付近と, 2.5 ~ 3.5 kHz の範囲の周波数領域で, 強い discrete なスペクトル, また同時に弱い広帯域スペクトルが観測されている。

まず, LHR 周波数付近のスペクトルは, 6 kHz とオーバーラップしていて, 波数計測の結果(図9)と対比しても, LHR 波と断定できる。波数計測周波数を 6.5 kHz に shift した場合には, 受信機を中心周波数は, discrete なエミッションから離れているが, この時, 波数計測器では強い波動は観測されていない。両者の結果が矛盾なく説明可能である。

このことは, 低エネルギー電子ビームにより励起されるプラズマ波動で, LHR 周波数付近の discrete なスペクトルは, 波数測定の結果, LHR 波に対応することを示している。

ところで, これらの結論は, K-9M-61号機の観測によりすでに得られている。図11,

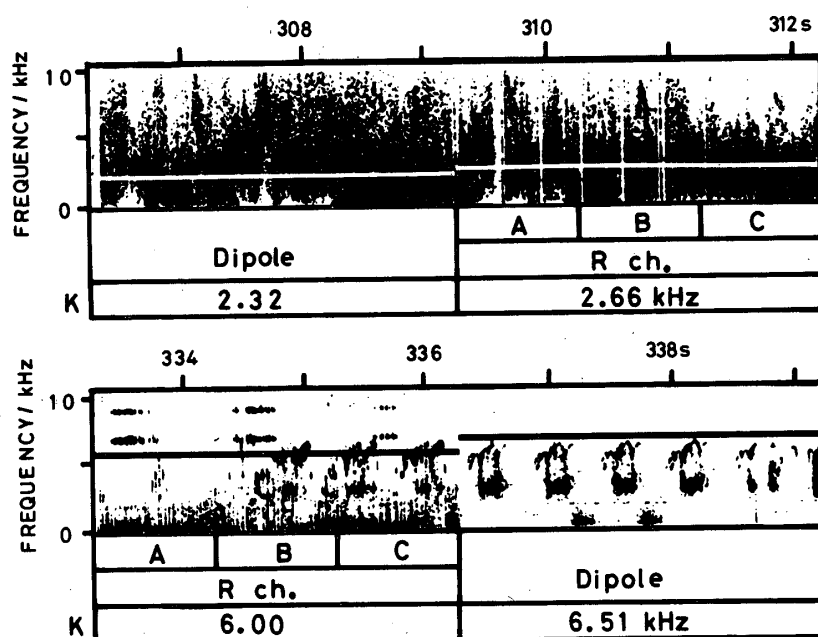


図10 観測された波動の dynamic spectrum. 3 秒毎に受信センサーが dipole antenna および波数計測用プローブとで切り換えられている. 発射後 306 秒から数秒間は広帯域に広がったエミッションが観測されているが, 発射後 335 秒以降は LHR 周波数付近と 2.5 ~ 3.5 kHz の範囲の強い discrete なエミッション, および広帯域に広がった弱いエミッションが観測された. また, 波数測定 of 固定周波数を, 上段は白い直線, 下段は黒い直線で dynamic spectrum 上に表示している。

12 に 61 号機で得られた, 磁力線に対して平行および垂直方向の波数の観測結果を示す. また, この観測に対応する dynamic spectrum の一例を図 13 に示すが, スペクトルは, 図において A), B) で示される強い discrete なエミッション, および C) で示される広帯域にわたる弱いエミッションに分類することができる. したがって, 図 11, 12 で示した波数の観測結果と対比すると, A) はイオン音波, B) は LHR ion cyclotron 波, C) は ion cyclotron harmonic 波であることが結論される.

すなわち, K-9M-67 号機で得られた結果は, ここで述べた K-9M-61 号機の結論を支持し再確認するものである.

##### 5. スペースチェンバーで観測されたプラズマ波動

記述は前後するが, これらのロケットの飛翔実験に先立ちスペースチェンバー内の実験を行なっている. スペースチェンバー内に Hot Cathode を設置し, 低エネルギー電子ビームを放

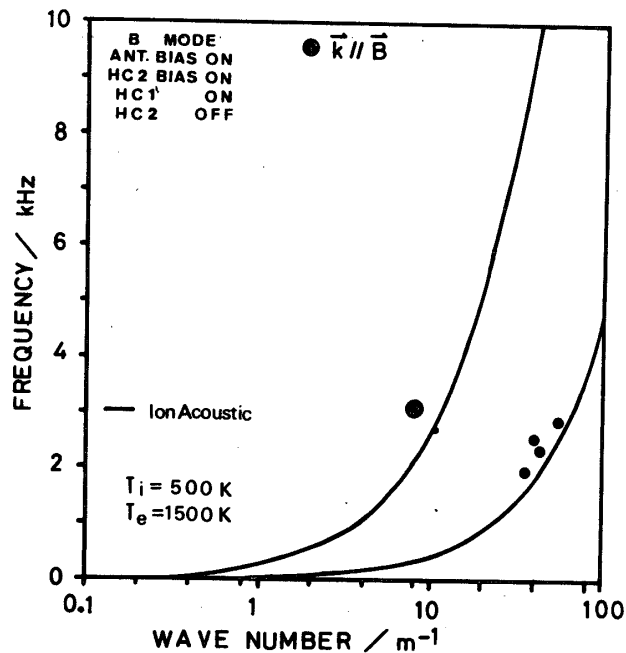


図11 K-9M-61号機で観測された磁力線に平行方向の波数.

射し、プラズマ波動を励起しつつ実験を行なった。観測された波動のスペクトルならびに、Faraday cupで観測された電子のエネルギー分布を図14に示す。まずこの場合、波動はLHR周波数以上に展開するスペクトルとして観測されたが、電子エネルギー分布のデータを解析すると、図15に示されるように、プラズマの熱運動成分と、電子beam成分に分離することができる。さらに図16には、このbeam成分に関連し、LHR波、ion cyclotron harmonic波の分散曲線の理論値を、観測された波動のスペクトルとともに示す。ここで、電子beamと磁力線のなす角度が $89.8^\circ$ の場合に相互作用すると仮定し、電子beamのenergyと広がり(温度)を考慮すると、図16の $f-k$  diagram上における3本の細い実線で囲まれた領域で、波動と粒子が相互作用する。このように考えると、LHR周波数より高い周波数で相互作用し、波動が発生することが理解される。

これに対して、スペースシャッターにおいて、Hot Cathodeの条件を変えると、図17に示すような電子エネルギー分布とこれに対応した波動のスペクトルが得られたが、図14と比較すると波動はLHR周波数の前後の広い周波数帯域で受信され、しかも電子beamの広がり(温度)は高くなっている。この場合について、理論的な分散曲線と比較すると、図18のようになる。図16の場合と同様に磁力線と電子beamのなす角度が $89.8^\circ$ の場合に観測事実が説明つくが、この角度は、電子beamの速度をdispersion curve上でLandau条件を満たすように表現した時、LHR波とion cyclotron harmonic波が接合する臨界的な角度に対応している。この場合も相互作用がおきる領域を図16と同様な形式で表示している。

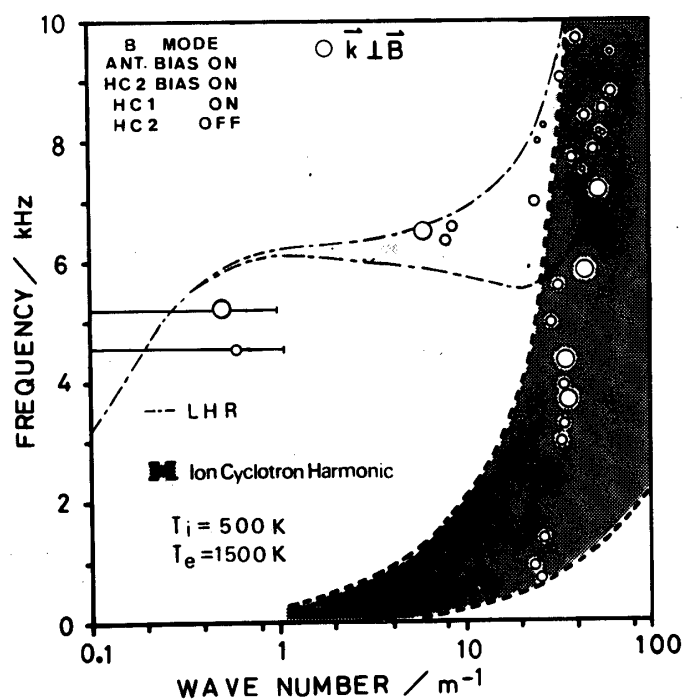


図12 K-9M-61号機で観測された磁力線に垂直方向の波数. 図9と同様に2種類のモードに分類して示す.

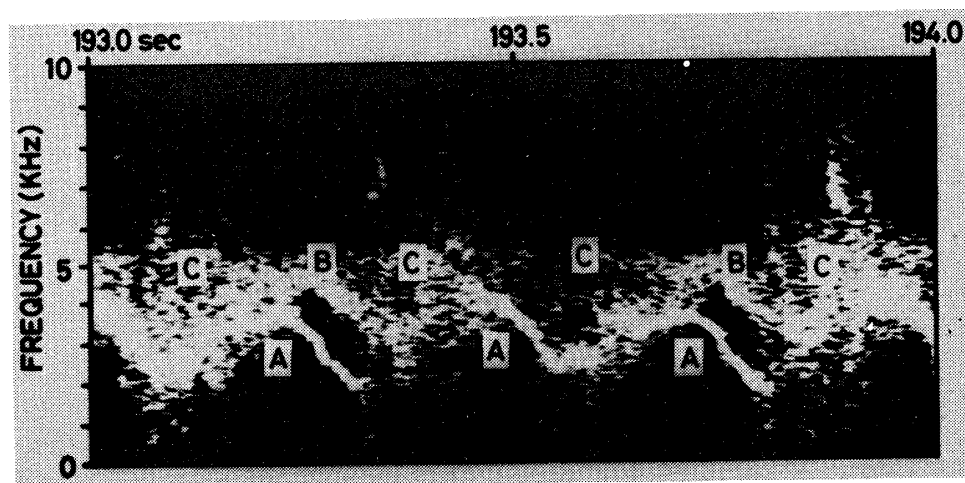


図13 K-9M-61号機で観測されたdynamic spectrum. A), B)で示される2種類の強いdiscrete emissionおよびC)で示される弱い広帯域 emission に分類されるが, 波数測定の結果 (図11, 12 参照), A)はイオン音波 B)はLHR ion cyclotron 波, C)は ion cyclotron harmonic 波であることが判明した.

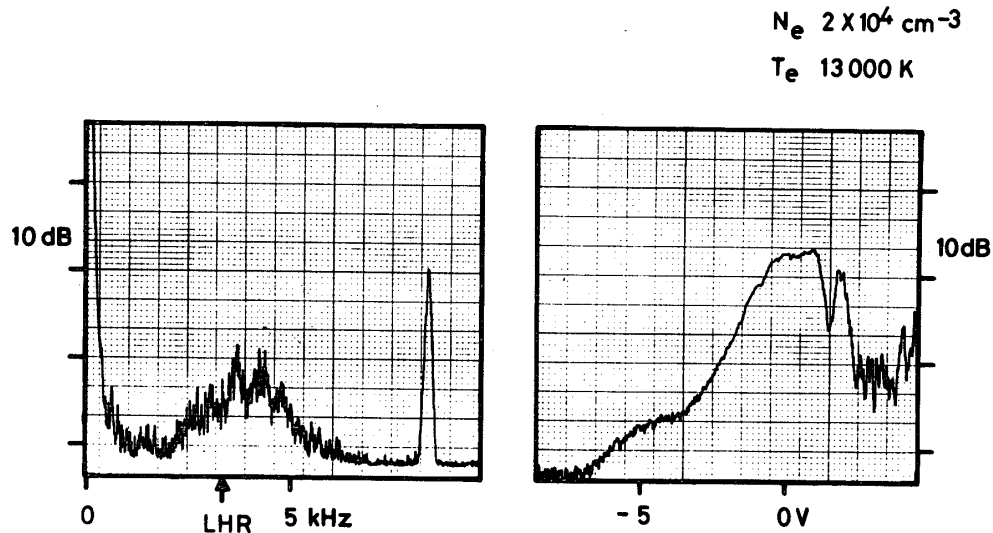


図 14 スペースチェンバーで観測された波動の周波数スペクトルおよび電子のエネルギー分布. 波動は LHR 周波数以上の周波数で観測され, 比較的シャープな電子ビームが観測された.

が, 電子 beam が高温であるため, 相互作用をおこす領域が, ion cyclotron harmonic 波の有効分散領域にまで広がっている. すなわち, 電子 beam は, plasma との相互作用の結果, ion cyclotron harmonic 波を発生させ, 受信される波動が, 図 18 にも示されているように, 広帯域に広がると考えられる. この部分の観測事実は, ロケットの飛翔実験で, 電離圏中において求められた LHR 放射と基本的に一致するものである.

## 6. 結 論

波数計測実験として計画した, K-9M-61 号, 66 号, 67 号 ロケットによる観測にそれぞれ成功した. これらの実験は, 宇宙空間の自然プラズマ波動と同等な現象として, 低エネルギー電子ビームによって励起される波動の波数計測を行なった. その結果, 観測された波動は,

- i) LHR ion cyclotron 波 (磁力線に垂直な  $\vec{k}$  をもつ)
- ii) ion cyclotron harmonic 波 (磁力線と比較的垂直な  $\vec{k}$  をもつ)
- iii) ion 音波 (磁力線方向に  $\vec{k}$  をもつ)

の 3 種類のモードの波動が混在するという結論が得られた.

また, ダイナミックスペクトル上で 5~7 kHz 付近に観測される discrete な強いスペクト

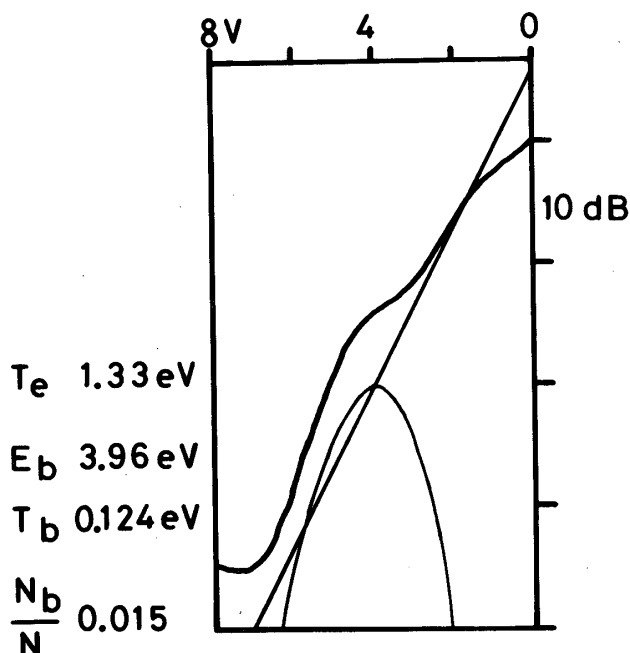


図 15 熱運動成分とビーム成分に分類された、図 14 の電子エネルギー分布。

ルが LHR 波で、広帯域に広がるスペクトルが ion cyclotron harmonic であることが判明した。

さらに、ロケット実験に先立って行なわれたスペースチェンバー実験で得られた結果として、電子ビームの温度によって、i) LHR 周波数で cut off をもつスペクトルと、ii) LHR 周波数の前後で広帯域に広がるスペクトルが観測されることが示された。このことから、波動と相互作用をおこす電子ビームが磁力線となす角度条件が  $\omega - k$  曲線上で、ion cyclotron harmonic 波と LHR 波が接合する critical な領域と対応する部分で、波動が生ずることが明瞭になった。

今後は、磁気圏あるいは極域電離圏の中に存在する自然プラズマ波動の波数測定を目標として測定装置の改良を行ないつつ、この実験を進めてゆく計画である。

#### 謝 辞

終りに、K-9M-61, 66, 67 号ロケットの飛翔を担当した東京大学宇宙航空研究所のスタッフの方々、および機器製作にあたった明星電気株式会社の方々の努力に感謝するとともに、スペースチェンバーを利用するにあたり、大変お世話になった東京大学宇宙航空研究所の土田氏、細谷氏に厚く感謝します。

1980 年 11 月 10 日

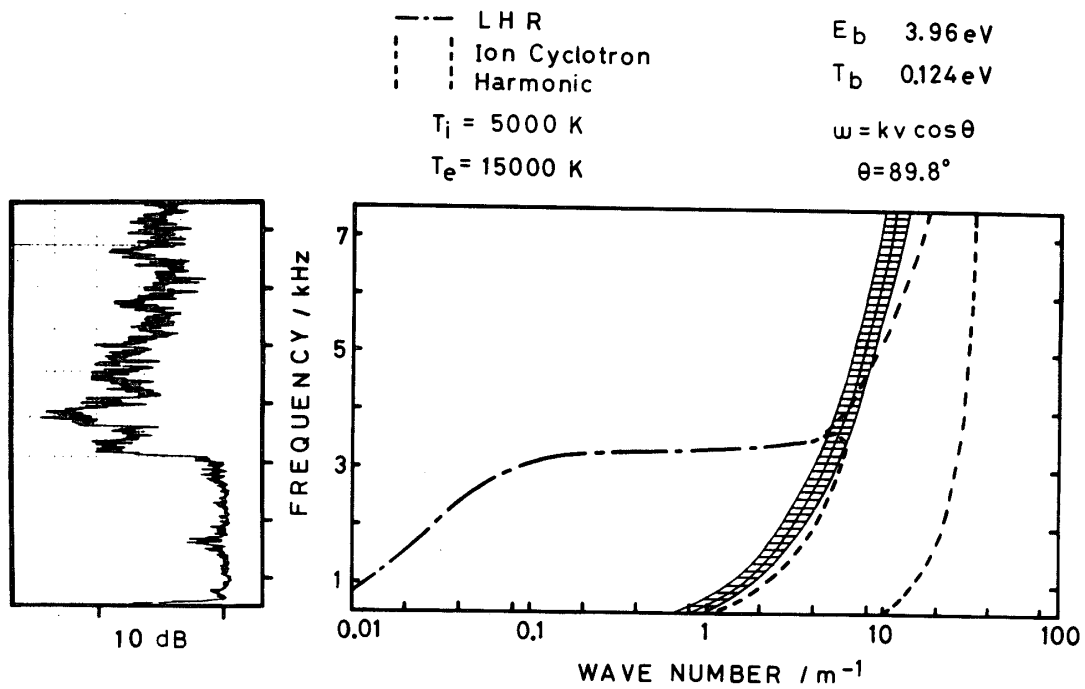


図16 図14の波動の観測結果を、磁力線と垂直な $\vec{k}$ をもつ理論的な分散曲線と対比して示す。電子ビームと波動がLandau条件を満足して相互作用する領域を横線で示している。波動のスペクトルがLHR周波数以上で観測されたが、磁力線と電子ビームのなす角度を $89.8^\circ$ と仮定すると、相互作用領域は、LHR周波数以上となり観測事実が説明される。



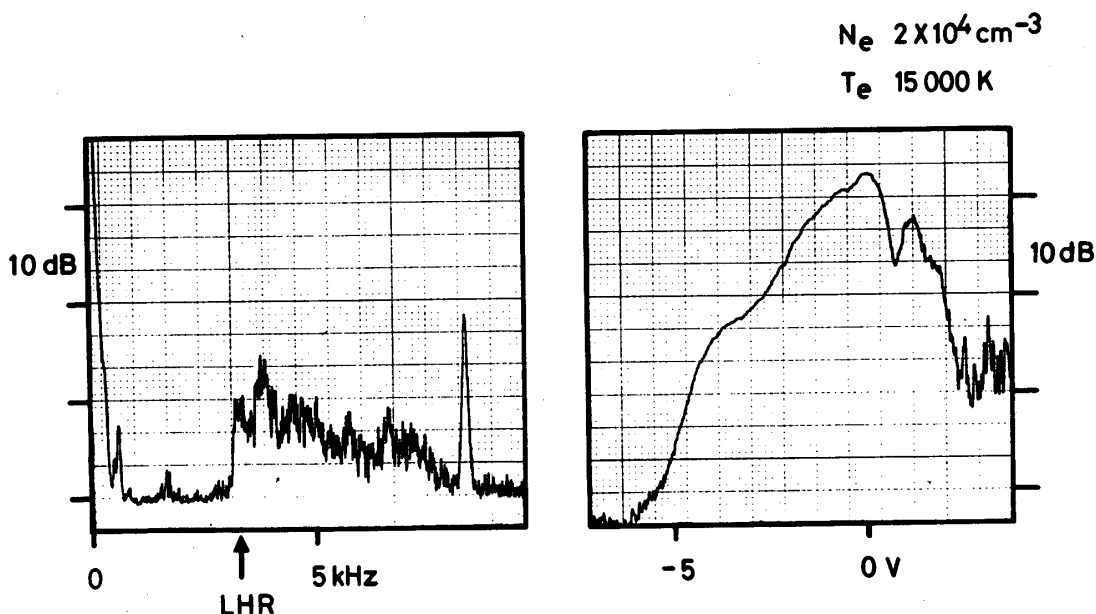


図 17 図 14 と Hot Cathode の条件を変えた場合の波の周波数スペクトルと電子のエネルギー分布。波動は LHR 周波数前後の広い周波数帯域で観測され、エネルギー分布に広がりがある電子ビームが観測された。

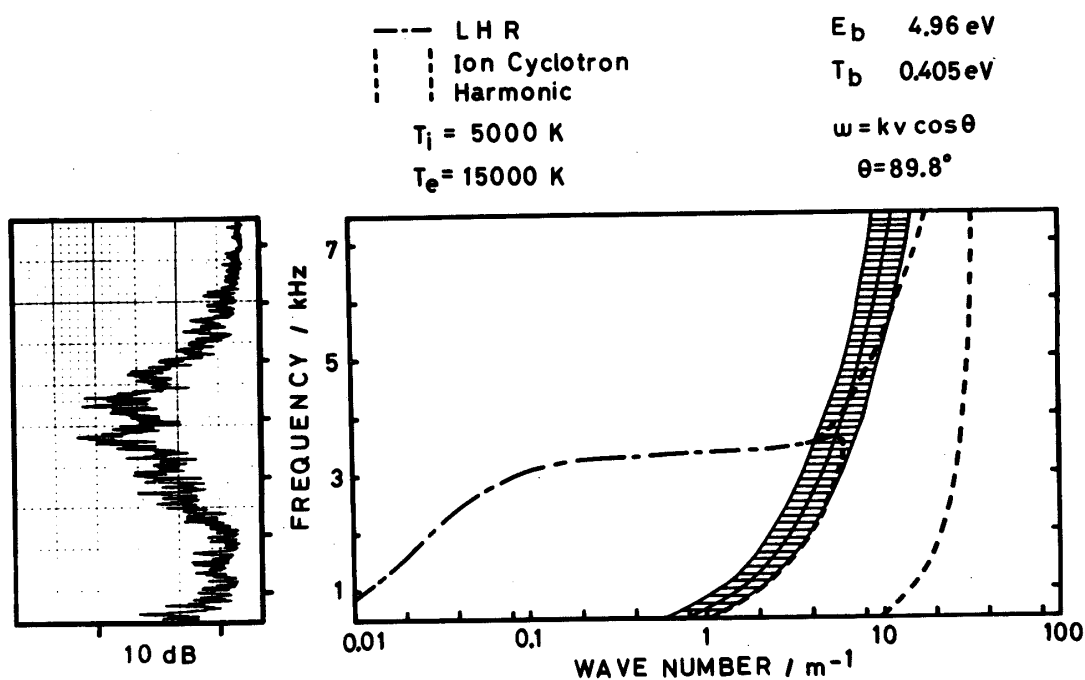


図 18 図 17 の観測結果を図 16 と同様な形式で理論的な波の分散曲線と対比して示す。電子ビームに広がりがあることから、電子ビームと波動の相互作用領域は、ion cyclotron harmonic 波の有効分散領域にまで広がり、広い周波数領域で波動が発生する。これは、LHR 周波数前後の広い周波数帯域での観測結果を説明する。